



40ª RAPv – Reunião Anual de Pavimentação

Rio de Janeiro, RJ - 08 a 12 de novembro de 2010

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Liseane Thives¹, Glicério Trichês¹, Paulo Pereira², Jorge Pais²

RESUMO

O comportamento das misturas asfálticas é dependente da temperatura e das condições do carregamento aplicado e para caracterizar a sua rigidez (ou módulo dinâmico) e resistência à fadiga é necessário a execução de ensaios que abranjam o controle de temperaturas e de frequências. No geral, o módulo dinâmico e o seu respectivo ângulo de fase são determinados em diferentes temperaturas e frequência de carregamento possibilitando a modelação da sua curva mestra. Entretanto, o desempenho a fadiga é geralmente caracterizado a partir de uma única temperatura e frequência de carregamento, sendo os modelos de fadiga estabelecidos, na sua forma mais simples, em função unicamente da deformação específica de tração inicial. Por outro lado, há uma tendência a nível mundial, e também no Brasil, de se considerar no dimensionamento racional de um pavimento o somatório dos danos individuais de cada eixo na análise da ruptura por fadiga, ao invés da atual transformação do tráfego em um número de solicitações equivalentes de operações do eixo padrão de 8,2 tf. Este enfoque, permite levar em conta no dimensionamento a influência do clima e da pluviosidade da região de implantação da rodovia no comportamento dos materiais. Para isto, é necessário, entre outros, que as curvas de fadiga das misturas asfálticas sejam expressas também como uma função da temperatura. Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre misturas com asfalto-borracha e com ligante convencional, através de suas curvas de fadiga determinadas a partir do ensaio de flexão alternada em quatro pontos, levando em conta a variação dos módulos dinâmicos em função da temperatura. Os resultados mostraram que as misturas com asfalto-borracha apresentaram um desempenho à fadiga muito superior à mistura convencional.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga, Módulo dinâmico, Temperatura.

ABSTRACT

The behavior of asphalt mixtures depends on the temperature and the load applied conditions. In order to characterize the asphalt mixture rigidity (or dynamic modulus) and the fatigue resistance is necessary carrying out some tests that include the temperatures and the frequencies control. In general, the dynamic modulus and the respective phase angle are determined from different temperatures and load frequency, making possible to establish the master curve. However, the fatigue performance is usually characterized starting from a single temperature and load frequency, being the models of fatigue established, in their simpler form, only in function of the initial traction specific deformation. On the other hand, there is a world tendency, and also in Brazil, to consider in the pavement design, the sum of the individual damages of each axis in the analysis of the fatigue rupture, instead of the current transformation of the traffic in a number of equivalent requests of operations of the standard axis of 8,2 tf. This focus, allows to take into account into the pavement design, the influence of the climate and the rainfall in the area of highway implantation, and besides, the materials behavior. For this, is necessary, among others, that the fatigue curves of the asphalt mixtures must be expressed as a temperature function. This work presents a comparative study between asphalt-rubber and the conventional mixtures, through their curves of fatigue determined from the alternated flexural four point bending test, taking into account the variation of the dynamic modulus in function of the temperature. The results showed that asphalt-rubber mixtures presented an a very superior fatigue performance in relation to conventional one.

KEY-WORDS: Fatigue; Dynamic Modulus; Temperature

¹ Universidade Federal de Santa Catarina. liseanethives@gmail.com, www.rodoviasverdes.ufsc.br

² Universidade do Minho, Portugal. ppereira@civil.uminho.pt, jpais@civil.uminho.pt



INTRODUÇÃO

A rigidez de uma mistura asfáltica, expressa por seu módulo dinâmico, depende da temperatura e do tempo de atuação e frequência do carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos, com as seguintes considerações: (i) a rigidez é mais elevada quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento. Neste caso, o comportamento da mistura é essencialmente elástico; (ii) a rigidez elástica de uma mistura é função da rigidez elástica do asfalto e da composição volumétrica e granulometria da mistura; (iii) a rigidez é mais reduzida para altas temperaturas e longos tempos de carregamento, e o comportamento da mistura é essencialmente viscoso.

Tendo-se em conta que o comportamento das misturas asfálticas é dependente da temperatura e das condições do carregamento, para caracterizar o seu módulo dinâmico, ângulo de fase e resistência à fadiga é necessário a execução de ensaios que abranjam o controle de temperaturas e de frequências do carregamento.

No geral, o módulo dinâmico e o seu respectivo ângulo de fase são determinados em diferentes temperaturas e frequências de carregamento possibilitando a modelação da sua curva mestra. Entretanto, o desempenho a fadiga é geralmente caracterizado a partir de uma única temperatura e frequência de carregamento, sendo os modelos de fadiga estabelecidos, na sua forma mais simples, em função unicamente da deformação específica de tração inicial.

O fenômeno de fadiga é descrito como um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de deformações repetidas, resultando em fendas ou ruptura completa, após um número suficiente de repetições de carregamento, ou seja, é a perda que o material sofre, quando solicitado repetidamente por uma carga.

Há uma tendência a nível mundial, e também no Brasil, de se considerar no dimensionamento racional de um pavimento o somatório dos danos individuais de cada eixo na análise da ruptura por fadiga, ao invés da atual transformação do tráfego em um número de solicitações equivalentes de operações do eixo padrão de 8,2 tf. Este enfoque, que representa uma mudança de paradigma no Brasil, permite levar em conta no dimensionamento do pavimento a influência do clima e da pluviosidade da região onde será implantada a rodovia no comportamento dos materiais e destes, na distribuições de tensões e deformações na estrutura do pavimento. Para isto, é necessário, entre outros, que as curvas de fadiga das misturas asfálticas sejam expressas também como uma função da temperatura.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre misturas com asfalto-borracha e com ligante convencional, através de suas curvas de fadiga determinadas a partir do ensaio de flexão alternada em quatro pontos, levando em conta a variação dos módulos dinâmicos em função da temperatura. Os autores acreditam que os modelos apresentados, obtidos com ligantes brasileiros, e a consideração do somatório dos danos individuais de cada eixo na análise da ruptura por fadiga, tornará o dimensionamento de pavimento no Brasil mais racional, levando a um aumento da durabilidade dos revestimentos asfálticos brasileiros.

MISTURAS ASFÁLTICAS ESTUDADAS

Neste estudo foram avaliadas quatro misturas asfálticas com asfalto-borracha e uma mistura convencional. Para confecção das misturas com asfalto-borracha foram utilizados ligantes produzidos nos sistemas *contínuos blend* e *terminal blend*, com dois tipos de borracha, ambiente e criogênica, seguindo as especificações da ASTM D 6114 (1997), tipo II.



Os ligantes com asfalto-borracha do tipo *terminal blend* foram produzidos em unidade industrial com duas percentagens de borracha incorporada: 20% e 15% e tiveram como asfalto base o CAP 50/70 e borracha do tipo ambiente. Os ligantes do tipo *continuous blend* foram confeccionados em laboratório utilizando borracha do tipo ambiente e criogênica e asfaltos base CAP 50/70 (BB), oriundo do Brasil, e CAP 35/50 (BC), proveniente de Portugal. A borracha (percentagem de 17%) foi incorporada ao asfalto por meio de agitação mecânica durante um tempo de digestão de 90 minutos a uma temperatura de 180°C.

A granulometria foi, para as misturas *gap graded* a especificada pelo *California Department of Transportation* – Caltrans tipo ARHM-GG (*Asphalt Rubber Hot Mix Gap Graded*) e, para as misturas *dense graded* pelo *Asphalt Institute*, AI tipo IV. A mistura controle escolhida foi a especificada pelo DNIT– ES 031 (2006), CAUQ faixa “C”, com asfalto convencional CAP 50/70 (DNIT – EM 095, 2006).

Os ligantes foram avaliados por meio de ensaios de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade Brookfield, resiliência e de envelhecimento RTFOT (*Rolling Thin-Film Oven Test*).

Os agregados graníticos utilizados apresentaram a seguinte designação granulométrica: (i) brita 6/12 – tamanho nominal 6,0 a 12,0 mm; (ii) brita 4/10 – tamanho nominal 4,0 a 10,0 mm; (iii) brita 0/4 (pó de pedra) – tamanho nominal inferior a 4,0 mm. Um filer calcítico foi utilizado como material de enchimento. As misturas estudadas foram projetadas por meio da Metodologia Marshall. A Tabela 1 apresenta nomenclatura adotada e as características das misturas avaliadas, como o tipo de granulometria, o tipo de asfalto, o asfalto base e o tipo e percentual de borracha. A Tabela 2 mostra os resultados da dosagem.

Tabela 1. Características das misturas estudadas

Mistura	Granulometria	Tipo de asfalto	Tipo e percentagem de borracha
CBB201	Caltrans <i>gap graded</i>	<i>Terminal blend</i> (base 50/70)	Ambiente (20%)
IBB151	<i>Asphalt Institute dense graded</i>	<i>Terminal blend</i> (base 50/70)	Ambiente (15%)
CBCbP	Caltrans <i>gap graded</i>	<i>Continuous blend</i> (base 35/50)	Criogênica (17%)
IBCbB	<i>Asphalt Institute dense graded</i>	<i>Continuous blend</i> (base 35/50)	Ambiente (17%)
BBB	DNIT <i>dense graded</i> (CAUQ Fx C)	CAP 50/70	-

Tabela 2. Formulação das misturas estudadas

Mistura	Percentagem de asfalto (%)	Volume de vazios (%)
CBB201	8,5	6,0
IBB151	7,0	5,0
CBCbP	8,0	6,0
IBCbB	7,0	5,0
BBB	5,5	4,0

Após a formulação, foram moldadas placas (750 mm de comprimento, 490 mm de largura e 80 mm de espessura) para cada mistura, e compactada de acordo com a AASHTO PP3 (1994). As placas, foram posteriormente serradas para a obtenção dos corpos de prova (381,0 mm de comprimento, 50,8 mm de altura e 63,5 mm de largura) para os ensaios de módulo e de fadiga. Após a serragem e secagem em ambiente climatizado (20°C ± 1°C) foi feita a seleção dos corpos de prova, constituindo amostras homogêneas, através da medição das dimensões e da sua densidade aparente (metodologia da balança hidrostática).

ENSAIOS DE MÓDULO DINÂMICO

O módulo complexo E^* é definido como a razão entre a amplitude de uma tensão sinusoidal a uma pulsação ou velocidade angular ($\omega = 2\pi Fr$) aplicada a um material e a amplitude de uma deformação de tração sinusoidal. Considerando o carácter viscoelástico do material, a deformação de tração possui um atraso em relação à tensão, que é representado pelo ângulo de fase (ϕ). O módulo dinâmico é definido como o valor absoluto de módulo complexo $|E^*|$ que descreve as propriedades elásticas de um material viscoelástico linear submetido a um carregamento sinusoidal, sem períodos de repouso.

Para a realização dos ensaios de módulo dinâmico e de fadiga foi utilizado, como mostra a Figura 1(a), o equipamento (modelo CS 7800) dentro da qual se encontra um dispositivo que permite a realização de ensaios de flexão alternada em 4 pontos (4PB), Figura 1(b).

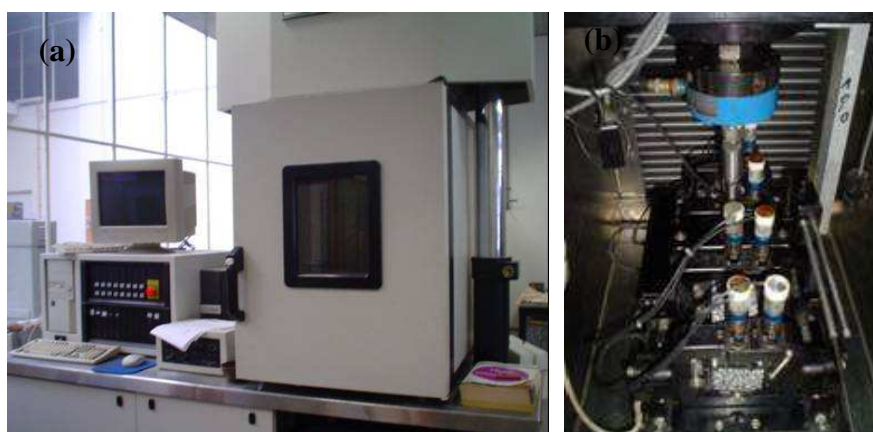


Figura 1. Equipamento para ensaios de módulo e fadiga

A determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase foi realizada aplicando-se um carregamento sinusoidal alternado, correspondente a uma deformação de tração máxima de tração na base do corpo de prova de 50×10^{-6} . Os ensaios foram conduzidos em ordem decrescente de frequência tendo se aplicado 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2 e 0,1 Hz, de acordo com o preconizado na norma ASTM 3497 (1995). O número de ciclos de carga foi de 100 para as três primeiras frequências e de 10 para as demais. A norma citada recomenda que os ensaios sejam conduzidos nas temperaturas de 5, 25 e 40°C, entretanto, optou-se pela temperatura de execução dos ensaios de fadiga, com variação de 5°C, assim, os ensaios foram repetidos para 3 temperaturas: 15, 20 e 25°C.

Os sete ensaios para cada temperatura foram realizados sobre o mesmo corpo de prova, sendo que o reduzido número de ciclos de carga não provoca significativa redução da rigidez do material, podendo o mesmo corpo de prova ser utilizado para realização dos ensaios de fadiga. A Tabela 3 apresenta os valores do módulo dinâmico e do ângulo de fase obtidos para a frequência de 10 Hz à temperatura de 20°C (temperatura na qual foram realizados os ensaios de fadiga). As misturas com asfalto-borracha apresentaram um módulo dinâmico menor que a mistura convencional.



Tabela 3. Módulo dinâmico e ângulo de fase das misturas (20°C, 10 Hz)

Mistura	Módulo dinâmico (MPa)	Ângulo de fase (°)
CBB201	4864	21
IBB151	4909	19
CBCbP	5192	17
IBCbB	6273	14
BBB	6314	20

ENSAIOS DE FADIGA 4PB

Para a determinação da resistência à fadiga foi realizado o ensaio de flexão alternada em quatro pontos (4PB), em deformação de tração controlada, à temperatura de 20°C e a três níveis de deformação de tração de tração (800×10^{-6} , 400×10^{-6} e 200×10^{-6}), obtidos através de um carregamento sinusoidal alternado, de acordo com a norma AASHTO TP8 (1994) (*Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt HMA Subjected to Repeated Flexural Bending*).

As Equações 1 e 2 representam a máxima tensão e deformação de tração de tração a partir dos resultados dos ensaios e as Equações 3 e 4 o módulo e o ângulo de fase, respectivamente, de acordo com a AASHTO TP8 (1994).

$$\sigma_{\text{tmax}} = \frac{0,357 \times F}{b \times h^2} \quad (1)$$

onde: $\sigma_{\text{tmáx}}$ = máxima tensão de tração (Pa); F = carga vertical total aplicada, ajustada para gerar no corpo de prova o nível de deformação de tração selecionado (N); b = largura do corpo de prova (m); h = altura do corpo de prova (m).

$$\epsilon_{\text{tmax}} = \frac{12 \times \delta_v \times h}{3 \times L^2 - 4 \times a^2} \quad (2)$$

onde: $\epsilon_{\text{tmáx}}$ = máxima deformação de tração de tração (m/m); δ_v = máxima deflexão vertical no centro do corpo de prova, medida com o LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), a partir da carga F aplicada (m); h = altura do corpo de prova (m); L = comprimento do corpo de prova medido entre as reações de apoio (m); a = espaçamento entre os pontos de aplicação de carga (m).

$$E = \frac{\sigma_{\text{tmáx}}}{\epsilon_{\text{tmáx}}} \quad (3)$$

$$\phi = 360 \times f \times s \quad (4)$$

onde: E = módulo dinâmico (MPa); ϕ = ângulo de fase (°); f = frequência de aplicação da carga (Hz); s = tempo de defasagem entre a aplicação de F e o deslocamento produzido no corpo de prova (s)

Nos ensaios de fadiga, realizados em deformação controlada, os resultados foram expressos em termos do número de ciclos que produz uma redução de 50% na rigidez inicial da mistura, representada pelo módulo dinâmico inicial. A determinação das curvas de fadiga corresponde a um



ajuste de uma função de potência $N = a \times (1/\epsilon_t)^b$ aos resultados obtidos nos ensaios. Os parâmetros obtidos são apresentados na Tabela 5, considerando a deformação de tração expressa em 10^{-6} . Verifica-se que houve um bom ajuste para todas as misturas.

Tabela 5. Parâmetros obtidos nos ensaios de fadiga

Parâmetro	CBB201	IBB151	IBCbP	CBCbP	BBB
a	$4,587 \times 10^{20}$	$2,031 \times 10^{21}$	$5,269 \times 10^{18}$	$2,782 \times 10^{17}$	$1,185 \times 10^{15}$
b	5,623	5,915	5,205	4,597	4,037
R ²	0,99	0,99	0,96	0,96	0,99

A Figura 2, apresenta as curvas de fadiga das misturas com asfalto-borracha, e também da mistura de controle BBB. As misturas com asfalto-borracha apresentaram uma maior resistência à fadiga em comparação com a mistura com asfalto convencional, sendo que o desempenho das misturas do tipo *terminal blend* foi superior às misturas do tipo *continuous blend*.

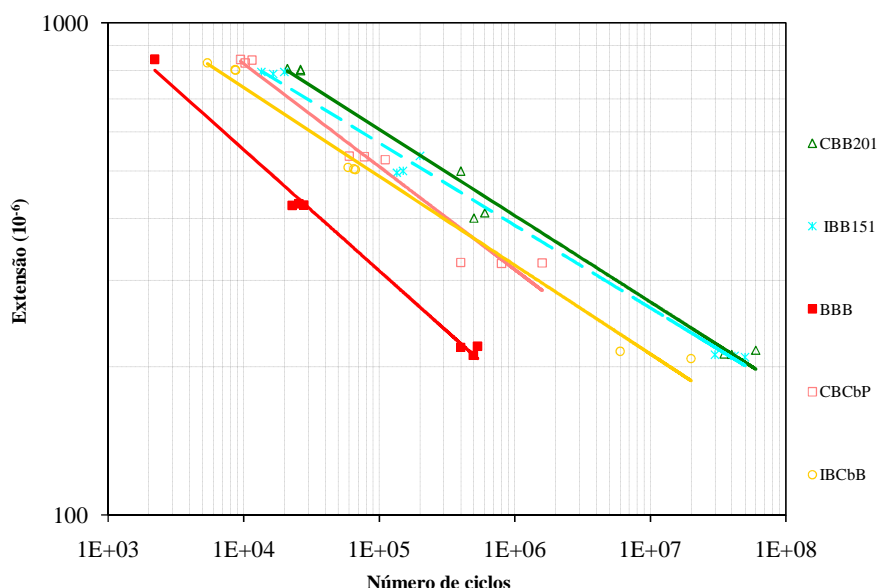


Figura 2. Curvas de fadiga das misturas estudadas para a temperatura de 20°C

CURVAS DE FADIGA E MÓDULO CONSIDERANDO O EFEITO DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Em determinadas análises, como por exemplo, o estudo da propagação de trincas em camadas de reforço, é necessária a consideração o efeito das variações de temperatura a que o pavimento está sujeito durante o seu período de projeto. Assim, os módulos dinâmicos das misturas asfálticas devem de ser expressos em função da temperatura.

Neste estudo, os módulos dinâmicos foram os determinados nas temperaturas de 15°C, 20°C e 25°C e para a frequência de 10 Hz, através do ensaio em laboratório 4PB. A partir dos resultados obtidos, foi desenvolvida um modelo de variação do módulo com a temperatura. Para temperaturas superiores a 25 °C, considerou-se que a variação do módulo segue o modelo expresso na Equação 5 e para temperaturas inferiores a 25 °C, o modelo de variação do módulo é dado pela Equação 6.



$$\log E = a + T \times b \quad (5)$$

$$E = a + T \times b \quad (6)$$

onde: E = módulo dinâmico (MPa); T = temperatura (°C); a, b = constantes experimentais.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros dos modelos de variação do módulo dinâmico das misturas asfálticas para as diferentes temperaturas, e a Tabela 7 mostra os módulos calculados para as temperaturas de -5; 5; 15; 20; 25; 40 e 50°C, à frequência de 10 Hz.

Tabela 6. Parâmetros dos modelos de variação do módulo dinâmico com a temperatura

Temperatura	Parâmetro	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
Acima de 25°C	a	4,196	4,259	4,133	4,165	4,364
	b	-0,025	-0,030	-0,018	-0,023	-0,028
Abaixo de 25°C	a	$1,025 \times 10^4$	$1,110 \times 10^4$	$1,098 \times 10^4$	$1,054 \times 10^4$	$1,471 \times 10^4$
	b	-268,285	-314,355	-242,232	-268,285	-412,855

Tabela 7. Módulo dinâmico a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Misturas e Módulos (MPa)				
	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
-5	11587	12667	12188	11881	16773
5	8904	9523	9766	9199	12644
15	6222	6380	7344	6516	8516
20	4880	4808	6132	5174	6451
25	3539	3236	4921	3833	4387
40	1532	1181	2691	1746	1678
50	870	596	1795	1026	871

Os valores apresentados na Tabela 7 são representados na Figura 3 evidenciando a forma como os modelos anteriores extrapolam o módulo dinâmico. Os valores do módulo obtidos em laboratório para 15, 20 e 25°C seguem uma variação linear (Equação 3) com a temperatura, o que conduziu à utilização do modelo linear para esta gama de temperaturas e para temperaturas inferiores a estas. A aplicação deste modelo a temperaturas superiores a 25°C conduziria a módulos negativos para temperaturas superiores a 30°C pelo que se optou, então, pelo modelo logaritmo (Equação 4).

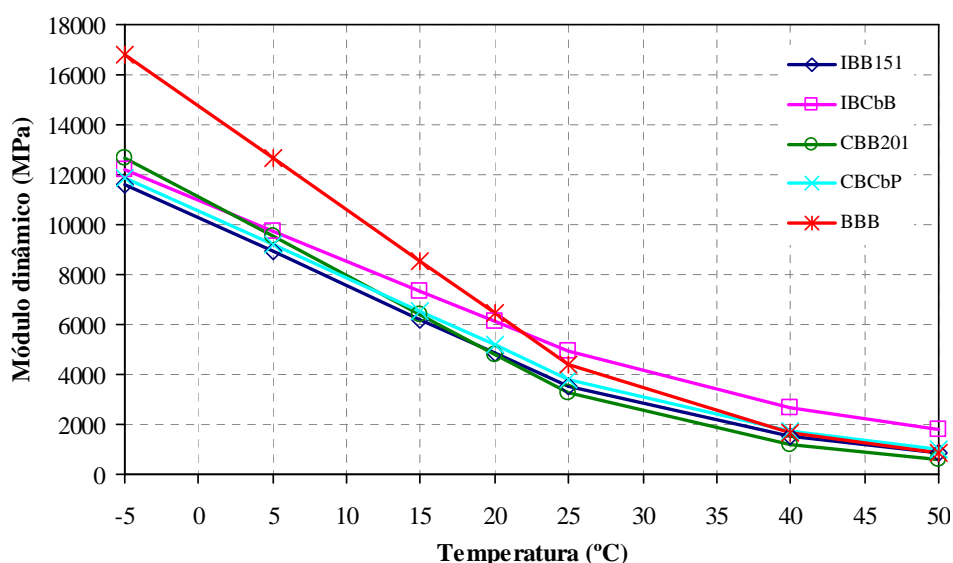


Figura 3. Variação do módulo dinâmico com a temperatura para as misturas asfálticas



Como mencionado, neste estudo as curvas de fadiga foram obtidas para a temperatura de 20°C. Para incorporar a influência da variação da temperatura no comportamento à fadiga, o comportamento viscoelástico das misturas foi caracterizado pelo módulo de relaxação por corte e volumétrico, expresso em termos de séries de Prony (conforme utilizado em Thives Fontes, 2009). O efeito da temperatura foi considerado pela aplicação do fator de escala Willian-Landel-Ferry, conforme proposto por Minhoto (2007). Tendo em conta a limitação do tamanho deste artigo, não foi possível descrever as deduções dos módulos de relaxação e a aplicação das séries de Prony. Assim, os autores Minhoto, 2007 e Thives Fontes 2009 podem ser consultados.

De acordo com o procedimento proposto, as curvas de fadiga das misturas asfálticas foram expressas em função da deformação de tração e do módulo dinâmico, de acordo com a Equação 7, captando, esta última variável, o efeito da temperatura. Os coeficientes obtidos são indicados na Tabela 8.

$$N = a \times E^b \times \varepsilon^c \quad (7)$$

onde: N = resistência à fadiga; E = módulo dinâmico (Pa); ε = deformação de tração de tração; a, b, c = constantes experimentais.

Tabela 8. Parâmetros dos modelos de fadiga de acordo com a Equação 7

Constantes	Misturas				
	IBB151	CBB201	IBCbB	CBCbP	BBB
a	$1,185 \times 10^{-4}$	0,2367	9,3182	$2,100 \times 10^{-3}$	$3,360 \times 10^{-4}$
b	-0,9368	-1,4172	-1,5236	-0,8066	-0,6320
c	-5,5705	-5,9711	-5,6842	-4,6954	-4,1910

As Figuras de 4 a 8 apresentam, para cada mistura, a qualidade do ajuste do modelo de fadiga, expresso de acordo com a Equação 7, e os correspondentes resultados obtidos em laboratório, verificando-se que os modelos obtidos (Tabela 8) representam de forma adequada a resistência à fadiga das misturas asfálticas.

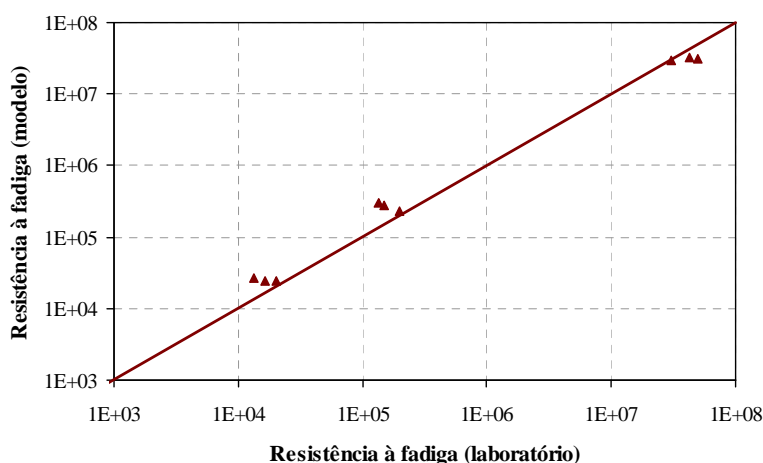


Figura 4. Ajuste do modelo de fadiga para a mistura IBB151

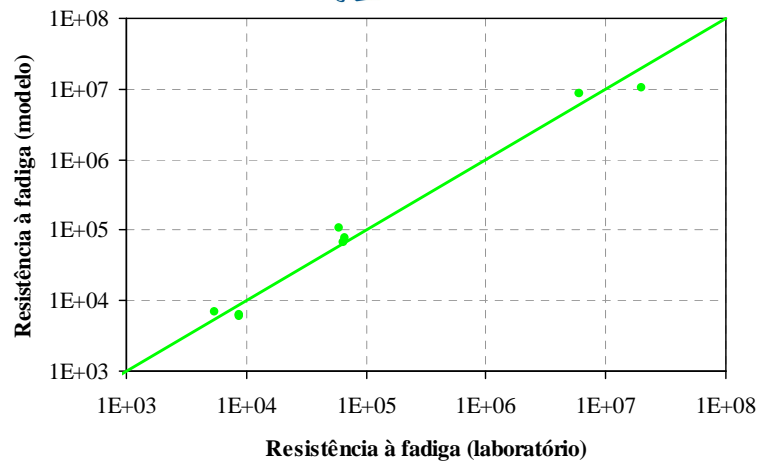


Figura 5. Ajuste do modelo de fadiga para a mistura IBCbB

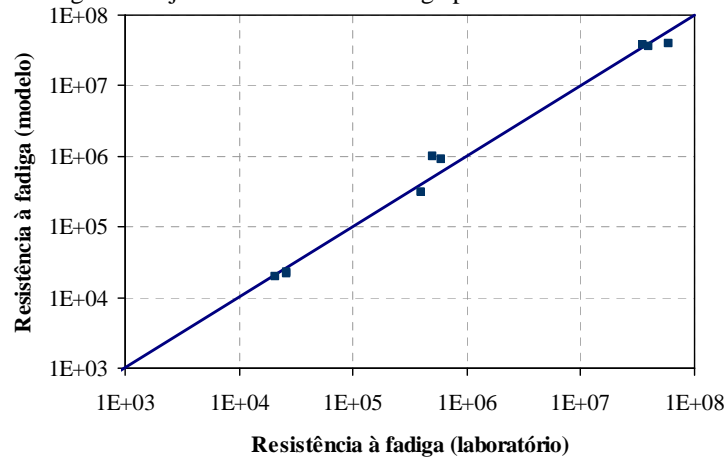


Figura 6. Ajuste do modelo de fadiga para a mistura CBB201

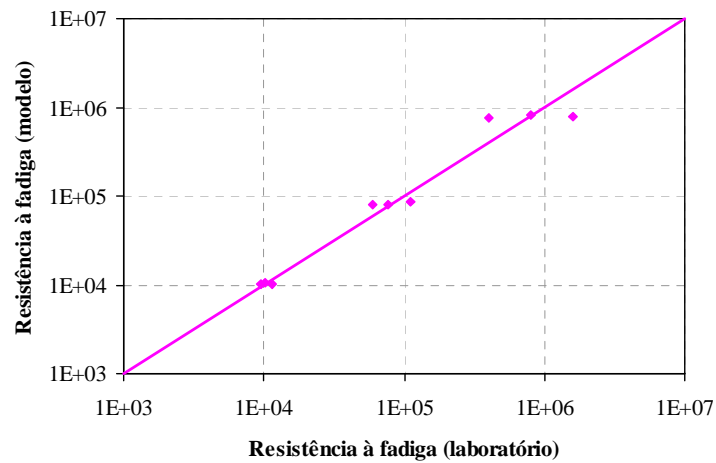


Figura 7. Ajuste do modelo de fadiga para a mistura CBCbP

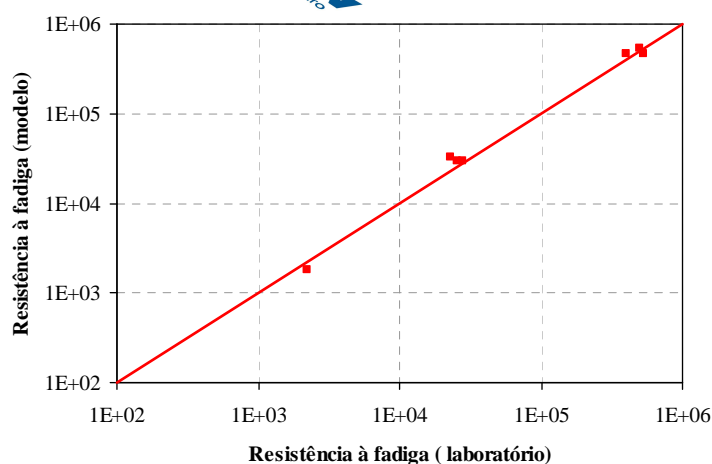


Figura 8. Ajuste do modelo de fadiga para a mistura BBB

As Figuras 9 a 13 apresentam as curvas de fadiga em função da temperatura. Por meio destas curvas é possível se estimar a vida útil da estrutura do pavimento em função da deformação de tração na face inferior da camada asfáltica, considerando a influência da temperatura da região onde será implantada a rodovia.

Para aplicação direta destas curvas, há de se considerar que os resultados obtidos neste trabalho são apresentados em termos de resultados de laboratório, não possuindo portanto, os fatores laboratório-campo. Para tanto, deve-se determinar um modelo para aplicação direta, considerando este fator, sendo que este modelo ainda encontra-se em desenvolvimento.

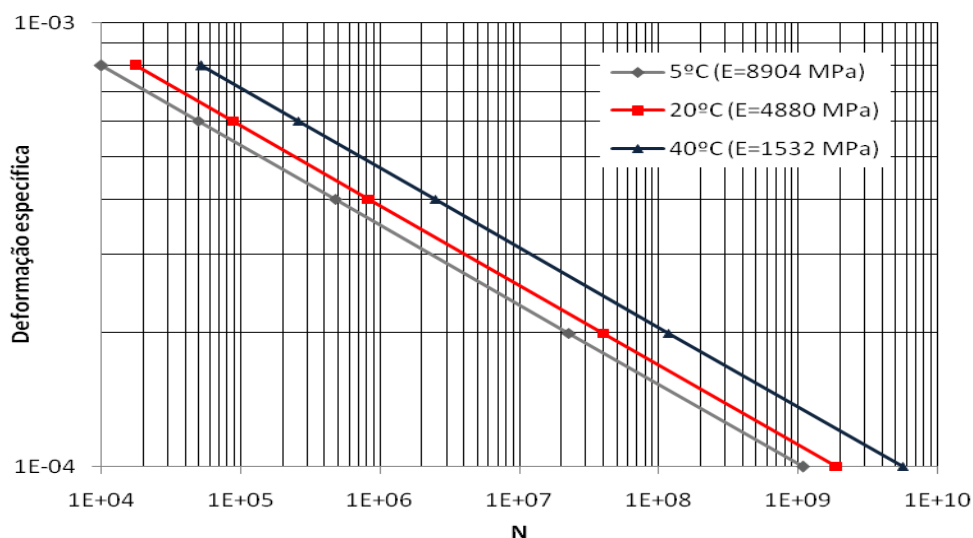


Figura 9. Evolução de N em função da deformação para cada temperatura da mistura IBB151

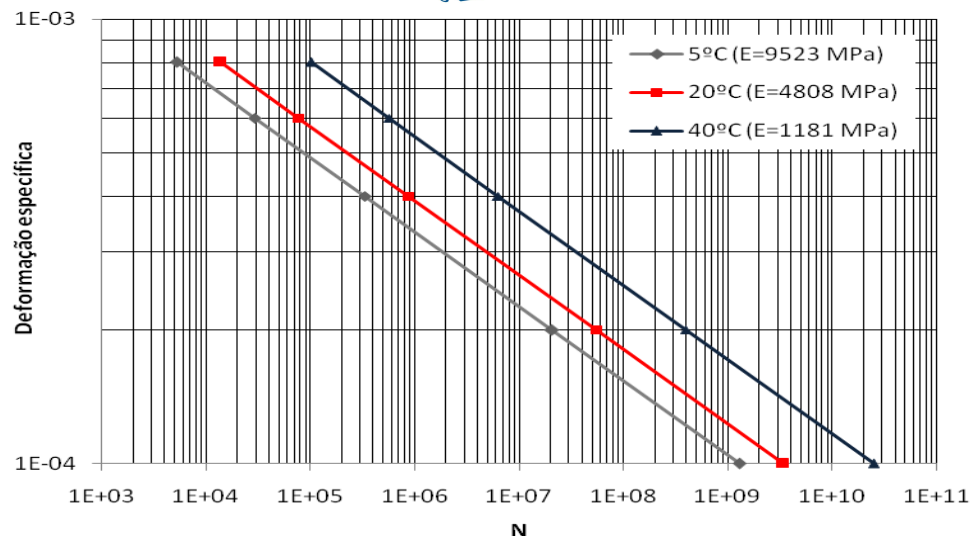


Figura10. Evolução de N em função da deformação para cada temperatura da mistura CBB201

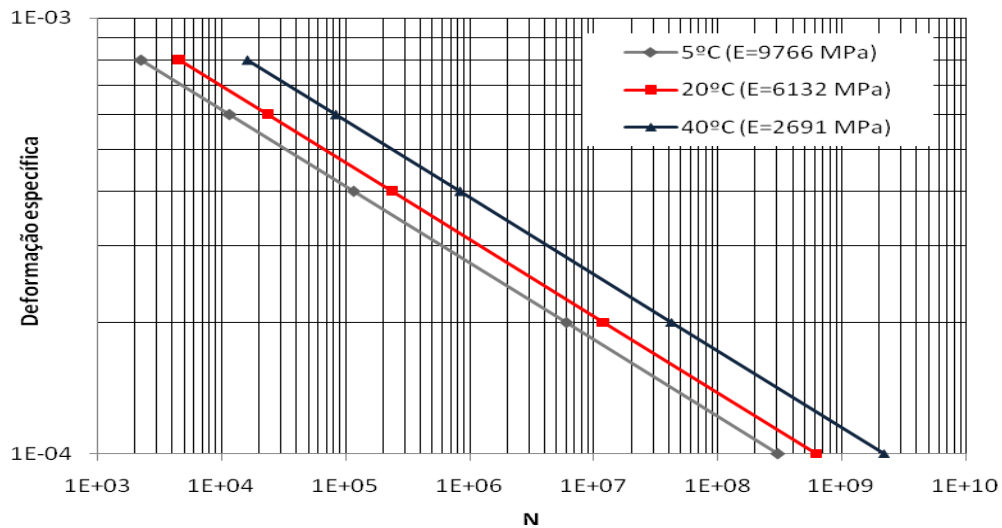


Figura 11. Evolução de N em função da deformação para cada temperatura da mistura IBCbP

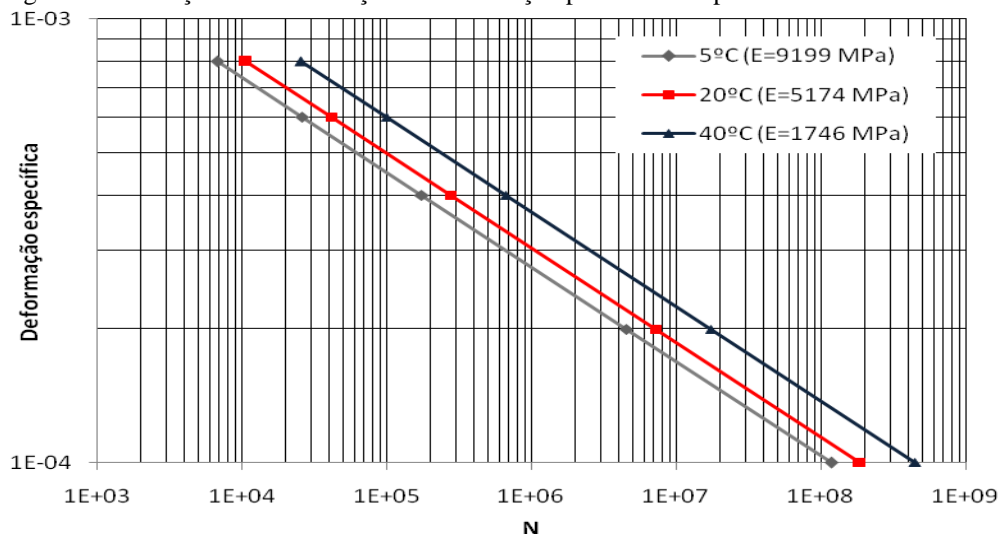


Figura 12. Evolução de N em função da deformação para cada temperatura da mistura CBCbP

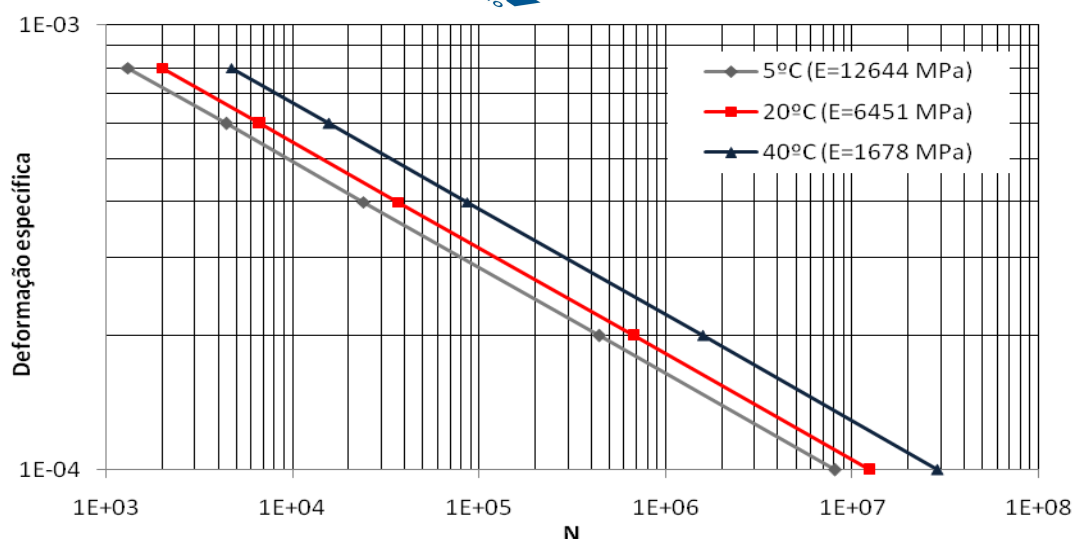


Figura 13. Evolução de N em função da deformação para cada temperatura da mistura BBB

CONCLUSÃO

O trabalho apresentado mostra que a temperatura da mistura asfáltica afeta o seu comportamento à fadiga. De maneira análoga aos modelos apresentados na literatura especializada, na medida em que a mistura asfáltica enrijece (diminuição da temperatura), ela se torna mais susceptível ao trincamento por fadiga. Os modelos apresentados, tornam possível a consideração da sazonalidade da temperatura na estimativa dos danos por fadiga causados pela passagem dos caminhões em cada estação do ano, possibilitando um dimensionamento mais racional da estrutura do pavimento.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao Programa ALβAN (Programa de Bolsas de Alto Nível da União Europeia para a América Latina), pela bolsa nº E04D040507BR durante os trabalhos em Portugal e ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa no Brasil. Agradece-se também à empresa Greca Asfaltos do Brasil pelo envio dos asfaltos brasileiros e da borracha tipo ambiente, e à Pedreira Bezerras de Portugal pelo fornecimento dos agregados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO PP3, 1994. Standard Specimens by Means of the Rolling Wheel Compactor Practice for Preparing Hot Mix Asphalt (HMA), USA.

AASHTO TP8, 1994. (Reapproved 1996, Reconfirmed in 2001). Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending). Standard based on SHRP Product 1019. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington D.C., USA.

AI, 1989. Asphalt Institute – The Asphalt Handbook, Manual Series nº 4 (MS 4). 1989 Edition, Kentucky, USA.

Antunes, M.L.B.C., 2005. Modelação do Comportamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Programa de Investigação e Programa de Pós Graduação Apresentados para a Obtenção do Título



de “Habilitado para o Exercício de Funções de Coordenação de Investigação Científica”. Lisboa, Portugal.

ASTM, 1996. Annual Book of ASTM Standards. Section 4: Construction. Vol. 04.3. Road and Paving Materials; Vehicle Pavement Systems. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken.

ASTM D 6114, 1997. Standard Specifications for Asphalt Rubber. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02. USA.

Caltrans, 2003. Standard Special Provisions. State of California Department of Transportation, Sacramento, California, USA.

DNIT, 2006. ES 031 (Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço). Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DNIT, 2006. EM 095 (Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de Material). Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa/IPR. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Minhoto, M.J.C., 2007. Consideração da Temperatura no Comportamento à Reflexão de Fendas dos Reforços de Pavimentos Rodoviários Flexíveis. Tese de doutorado, UMINHO, Portugal.

Partl, M.N. & Francken, L., 1998. Background of RILEM Interlaboratory Tests. Basic Elements of a Testing Methodology for Bituminous Pavement Materials and Significant Features for Testing. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. Brussels, Belgium.

Thives Fontes, L.P.L., 2009. Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Portugal e Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.